

BDS-3新频点信号双频精密单点定位精度分析*

卢福康^{1,2,3†} 余学祥^{1,2,3} 肖星星^{1,2,3} 胡富杰^{1,2,3}

(1 安徽理工大学空间信息与测绘工程学院 淮南 232001)

(2 安徽理工大学矿区环境与灾害协同监测煤炭行业工程研究中心 淮南 232001)

(3 安徽理工大学矿山采动灾害空天地协同监测与预警安徽普通高校重点实验室 淮南 232001)

摘要 北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System, BDS)已于2020年7月正式建成并开通,北斗三号(BDS-3)在旧信号B1I和B3I的基础上,增加了B1C、B2a新信号. 为了全面评估BDS-3的新信号B1C、B2a的定位性能,试验了GPS (Global Positioning System)、BDS-3、BDS-2/BDS-3新旧信号的定位性能和BDS系统不同频点与GPS组合定位性能,对BDS (B1I+B3I、B1C/B2a)+GPS (L1+L2)组合静态PPP (Precise Point Positioning)定位性能进行分析,并与单卫星系统对比分析. 试验结果表明: BDS-3 (B1C/B2a)在East (E)、North (N)、Up (U)方向的定位精度优于1.25 cm、0.89 cm、1.67 cm, BDS-3新旧频点在E、N方向上定位精度与GPS L1/L2在同一水平上, U方向上新频点定位精度高于GPS L1/L2和BDS-3旧频点,较旧频点定位精度提升了34.2%,新频点收敛时间25.9 min比旧频点提升了12.7%;相较于BDS、GPS单系统,组合系统BDS/GPS定位精度和收敛时间有了明显的提高, BDS-3 (B1C/B2a)+GPS在E、N方向上与BDS-3 (B1I/B3I)+GPS定位精度相当,在U方向上定位精度前者较后者有了明显的提升,提升了17.2%,组合系统新频点收敛时间20.1 min比旧频点提升了17.6%.

关键词 卫星定位, PPP, BDS-3, BDS-2/BDS-3, BDS/GPS, 定位精度, 收敛时间

中图分类号: P129; **文献标识码:** A

1 引言

随着北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite System, BDS)的第55颗卫星于2020年6月23日在西昌卫星发射中心成功发射并到达预定轨道,预示着我国北斗三号(BDS-3)最后一颗卫星的成功组网,也标志着我国自主研制的全球卫星导航系统即将向全球用户提供高精度、高质量的导航定位与服务. 按照“三步走”战略,我国BDS系统从第一代(BDS-1)的双星定位系统发展到第二代(BDS-2)区域性定位系统,最后建成了第三代(BDS-3)的全球性定位系统. BDS-3卫星星座一共

由30颗卫星共同组成,其中包括3颗倾斜地球同步轨道卫星、3颗地球静止轨道卫星和24颗中地球轨道卫星,在BDS-2代的基础上增加了4个新信号,具体为B1C (1575.42 MHz)、B2a (1176.45 MHz)、B2b (1207.140 MHz)和B2a+b (1191.79 MHz). 这也意味着完全建成的BDS-3卫星系统正式向全球提供导航定位与服务^[1-5]. 随着我国北斗卫星系统的建成,对BDS-3卫星系统定位服务性能会进行大量的研究. 目前在精密单点定位方面,就有不少文献对其进行了相关研究^[6-9]. 文献[10]对BDS-3新信号B1C/B2a进行了双频静态PPP (Pre-

2022-08-18收到原稿, 2022-11-07收到修改稿

*国家自然科学基金项目(41474026)、安徽省自然科学基金项目(2008085MD114)资助

†2865221055@qq.com

cise Point Positioning)初步分析, 得出B1C/B2a静态PPP与GPS (Global Positioning System)收敛时间相当^[10], 对于静态PPP, 收敛时间约为20–30 min, 水平方向定位精度可达1.38–4.42 cm, 高程定位精度可达1.31–4.34 cm. 文献[11]对BDS-3的B1I/B3I与BDS-3的B1C/B3I无电离层组合分析了新信号B1C对BDS精密单点定位的影响^[11]. 文献[12]对B1C/B2a双频PPP精度进行评估, 静态PPP在East (E)、North (N)、Up (U)方向上的精度分别为4.7 mm、6.9 mm和26.6 mm, 动态PPP在E、N、U方向的精度分别为6 cm、2.6 cm和8.5 cm^[12]. 文献[13]结果表明GNSS (Global Navigation Satellite System)组合系统可提高位置精度, 更好地抑制距离噪声, 有助于克服单个系统可靠性差, 精度低的问题^[13]. 文献[14]分析了BDS-2系统与不同卫星系统组合状态下的精密单点定位性能^[14]. 鉴于当前对BDS-3定位系统研究的不够全面, 早期对B1C/B2a信号能够播发的卫星数量较少, 对新信号的PPP定位性能研究较少, 不同的文献之间结论有一定的差异, 且比较缺乏对BDS-3新信号B1C/B2a与BDS-2 (B1I/B3I)、GPS (L1/L2)卫星组合系统的研究以及BDS-2、GPS卫星系统与BDS-3卫星系统新旧信号组合卫星系统的研究与比较. 本文主要分为两个部分, 第1部分是信号融合的双频无电离层组合PPP模型, 第2部分是对BDS-3/GPS、BDS-2/BDS-3/GPS新旧信号的卫星组合系统的研究, 分析其静态定位精度和收敛的时间, 文章重点内容在第4小节.

2 PPP模型

采用原始伪距和载波相位观测值结果可以表示为

$$\begin{cases} P_{r,j}^s = \rho_r^s + dt_r^s - dt^s + M_w^s T_w^s + \\ \gamma_j I_r^s + b_{r,j} + b_j^s + \varepsilon_{r,j}^s, \\ L_{r,j}^s = \rho_r^s + dt_r^s - dt^s + M_w^s T_w^s - \gamma_j I_r^s + \\ N_{r,j}^s + B_{r,j} + B_j^s + \xi_{r,j}^s, \end{cases} \quad (1)$$

式中: s、r分别表示卫星和接收机; $j = 1, 2, 3$ (下文*i*定义相同), 为信号频率编号; $P_{r,j}^s$ 、 $L_{r,j}^s$ 分

别代表卫星到接收机的原始伪距和载波相位观测值(单位: m); ρ_r^s 为卫星到接收机之间的几何距离; dt_r^s 、 dt^s 分别代表接收机钟差和卫星钟差; T_w^s 表示天顶对流层延迟及其对应的映射函数 M_w^s ; I_r^s 、 γ_j 是卫星到接收机之间信号传播所引起的电离层延迟及其对应的放大影响因子 γ_j , 其中 $\gamma_j = (f_1/f_i)^2$, f 表示频率; $b_{r,j}$ 、 $B_{r,j}$ 分别为接收机未校准的码延迟(Uncalibrated Code Delay, UCD)和未校准的相位延迟(Uncalibrated Phase Delay, UPD), 单位为m; b_j^s 、 B_j^s 分别是卫星的UCD和UPD; $\varepsilon_{r,j}^s$ 、 $\xi_{r,j}^s$ 分别代表卫星和接收机的原始伪距和载波相位观测值的观测噪声; 此外, (1)式中的其他误差项, 如相位缠绕、相对论效应、天线相位中心改正、固体潮均使用相应模型进行改正.

为方便起见, 将无电离层组合的系数定义为:

$$\begin{cases} \alpha_{ij}^s = \frac{(f_i^s)^2}{(f_i^s)^2 - (f_j^s)^2}, \\ \beta_{ij}^s = -\frac{(f_j^s)^2}{(f_i^s)^2 - (f_j^s)^2}, \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_{ij}^s 和 β_{ij}^s 为与频率相关的放大因子, f_i 和 f_j 代表了载波频率($i \neq j$).

一般来说, IGS卫星时钟产品是通过使用第1和第2频率的无电离层组合观测而产生的. 因此, 卫星时钟吸收了无电离层的卫星UCD, 则无电离层的单颗卫星时钟误差被定义为

$$\begin{cases} dt_{12}^s = dt^s - b_{12}^s, \\ b_{12}^s = \alpha_{12}^s b_1^s + \beta_{12}^s b_2^s, \end{cases} \quad (3)$$

其中 dt_{12}^s 表示由IGS卫星时钟产品提供的卫星时钟校正. b_{12}^s 表示卫星硬件偏差, 为了利用这种无电离层的卫星时钟产品, 将(3)式重新写成双频形式, 其公式为

$$\begin{cases} -dt^s + b_1^s = dt_{12}^s + \beta_{12}^s DCB_{12}^s, \\ -dt^s + b_2^s = dt_{12}^s - \alpha_{12}^s DCB_{12}^s, \end{cases} \quad (4)$$

其中DCB (Differential Code Bias)被定义为卫星码偏差($DCB_{ij}^s = b_i^s - b_j^s$). 将无电离层的卫星时钟与DCB校正一起应用到(1)式并进行线性化, 其公

式为

$$\begin{cases} p_{r,j}^s = \mu_r^s \cdot \mathbf{x}_r + dt_r^s + M_w T_w^s + \\ \gamma_j I_r^s + b_{r,j} + \varepsilon_{r,j}^s, \\ l_{r,j}^s = \mu_r^s \cdot \mathbf{x}_r + dt_r^s + M_w T_w^s - \gamma_j I_r^s + \\ N_{r,j}^s + B_{r,j} + B_j^s - b_{12}^s + \xi_{r,j}^s, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $p_{r,j}^s$, $l_{r,j}^s$ 分别表示观测值减去原始伪距和相位观测值的计算值; μ_r^s 是从接收机到卫星的单位向量; \mathbf{x}_r 是接收机位置相对于一个先验位置增量的向量。

双频无电离层PPP模型的估计参数包括接收器位置、时钟偏移量、天顶湿对流层延迟, 考虑所有卫星时, 将单卫星计算(5)式改为矩阵形式,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_{12} \\ \mathbf{l}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{E}_C & \mathbf{M}_w & \mathbf{E}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_r \\ dt_r \\ T_w \\ \overline{N_{r,12}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{p,12} \\ \varepsilon_{l,12} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

且

$$\begin{cases} dt_r^s = dt_r^s + b_{r,12}^s, \\ N_{r,12}^s = \alpha_{12}^s N_{r,1}^s + \beta_{12}^s N_{r,2}^s + B_{r,12}^s + \\ B_{12}^s - b_{12}^s - b_{r,12}^s, \end{cases} \quad (7)$$

式中加粗符号均对应包含所有卫星的矢量, 如 \mathbf{p}_{12} 、 \mathbf{l}_{12} 分别对应应包含所有卫星的无电离层伪距和相位观测值矢量; \mathbf{A} 是坐标向量 \mathbf{x}_r 的设计矩阵, \mathbf{E}_C 是一个 $n \times m$ 矩阵, 其中 n 为卫星数量, m 为系统数量, \mathbf{M}_w 是一个 n 维的列向量, \mathbf{E}_N 是对应模糊度 $\overline{N_{r,12}}$ 的 $n \times n$ 维矩阵, $N_{r,12}^s$ 是无电离层的浮点模糊度, $\varepsilon_{p,12}$ 和 $\varepsilon_{l,12}$ 为观测值对应的噪声, 其他相同元素含义见(1)式和(5)式。

3 数据来源和处理策略

BDS定位系统已建设并正式组网, 为了进一步研究BDS的PPP定位性能, 本文的数据是采取MGEX (multi-GNSS experiment)网所采集到观测数据, 数据是选择MGEX数据中心12个测站2021-07-10—2021-07-14共5 d的观测数据, 测站点分布见

图1, 其他精密星历产品和精密钟差均来自武汉大学IGS (International GNSS Service)数据中心。

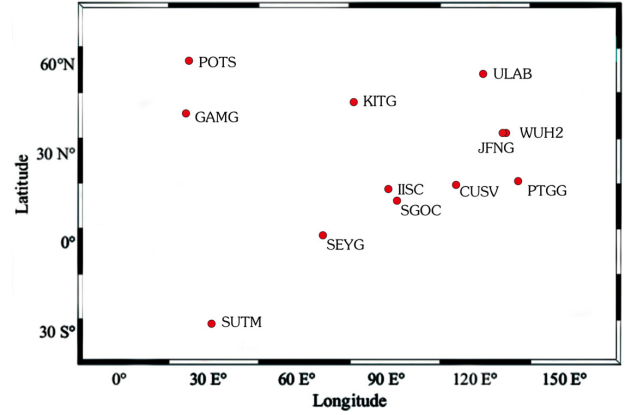


图1 选取的12个MGEX测站分布

Fig. 1 The distribution of 12 selected MGEX stations

在数据处理过程中, 精度验证是将文中解算的定位结果与IGS提供的snx文件周解值进行比较, 然后分析E、N、U这3个方向上的定位精度及收敛时间. 在数据处理时, 截止高度角设置为7°. 天线相位中心用igs14host.2097.atx模型改正. 相位缠绕、固体潮、相对论效应^[15-17]等误差通过模型加以改正. 对流层延迟采用Saastamoinen模型进行改正. 参数估计时, 接收机位置坐标采用常数估计、接收机钟差参数采用白噪声估计、模糊度当作实数进行估计、滤波采用卡尔曼滤波, 具体的PPP策略见表1.

4 实验结果分析

4.1 性能分析指标

本文主要通过分析N、E、U这3个方向上的定位精度及收敛时间, 收敛时间是3维方向定位误差达0.1 m以内并稳定至少20个历元所需要的时间, 定位精度为3个方向达到0.1 m并稳定至少20个历元的各方向误差平均值, 若超过0.1 m, 则以最后历元精度为准。

表 1 PPP处理策略
Table 1 PPP processing strategy

| Parameter | Process policy |
|-----------------------|-------------------------------------|
| Functional model | Ionosphere-free combined model |
| Sampling interval | 30 s |
| Satellite orbit | Precise ephemeris |
| Satellite clock error | Precise clock error |
| Functional model | Ionosphere-free combined model |
| Satellite elevation | 7° |
| Phase wrapping | Model correction |
| Solid tide | Model correction |
| Rotation of the earth | Model correction |
| Antenna phase center | igs14host_2097 model |
| Ionospheric delay | Ionospheric combination elimination |
| Tropospheric delay | Saastamoinen model |
| Receiver coordinate | Constant estimation |
| Receiver clock bias | White noise estimation |
| Ambiguity | Estimation |

4.2 BDS不同信号质量分析

本文通过对12个MGEX测站连续5 d的观测数据进行质量分析,从伪距多路径(multipath, MP)和载噪比(Carrier to Noise Ratio, CNR)两方面对BDS系统4个不同的信号进行数据质量分析. 伪距多路径是指观测站接收的信号也包含了因周围环境所反射的信号,并与卫星发出的信号发生干涉产生了偏离真值的误差;载噪比是指载波信号的功率与噪声功率谱密度的比值,是反映观测质量的主要指标之一. 首先计算12个测站连续5 d的伪距多路径均值如表2所示. 分析表明:不同的测站的多路径误差存在一定的差距,原因是每个测站的观测环境存在差距. 整体可以看出BDS系统各个频点相比较, B3I和B2a的多路径误差低于B1I和B1C,除了POTS测站,其他测站误差均低于30 cm;而B3I

与B2a的多路径误差相当, B1C的多路径误差低于B1I的多路径误差;总体来说, B1C/B2a的多路径误差低于B1I/B3I的多路径误差.

表 2 12个测站伪距多路径误差均值
Table 2 Mean pseudorange multipath error of 12 stations

| Signal | B1I/cm | B3I/cm | B1C/cm | B2a/cm |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| CUSV | 33.00 | 21.46 | 28.42 | 22.14 |
| GAMG | 26.46 | 14.52 | 24.80 | 17.82 |
| IISC | 32.18 | 24.58 | 27.56 | 27.40 |
| IFNG | 35.84 | 24.72 | 28.46 | 25.70 |
| KITG | 22.46 | 14.32 | 20.94 | 17.42 |
| POTS | 52.62 | 36.04 | 36.20 | 33.04 |
| PTGG | 26.16 | 15.76 | 23.82 | 19.60 |
| SEYG | 25.84 | 17.44 | 22.66 | 21.26 |
| SGOC | 37.36 | 27.54 | 32.40 | 21.20 |
| SUTM | 43.04 | 25.84 | 28.04 | 23.72 |
| ULAB | 40.06 | 25.26 | 32.36 | 23.18 |
| WUH2 | 38.15 | 23.62 | 30.65 | 22.57 |
| mean value | 34.43 | 22.59 | 28.00 | 22.92 |

卫星的多路径误差除了受测站的观测环境的影响,还与卫星的高度角有关,本文选取了2021年7月10号CUSV测站C24卫星为例进行分析,对BDS卫星4个频点B1I、B1C、B2a、B3I绘制了多路径误差序列图及高度角随历元变化的曲线图,如图2所示. 从图中可以看出,各频点的多路径误差随着卫星的高度角升高而降低;高度角低时,多路径误差分布不稳定;高度角高时,多路径误差低且稳定;B1I的多路径误差最大, B2a和B3I多路径误差相当.

接下来对载噪比进行分析,计算12个测站连续5 d的载噪比如表3所示. 分析表明,与多路径误差不同,各个测站的频点的载噪比相差较小,各频点的载噪比波动较小. 整体而言, B1I与B1C的载噪比低于B3I和B2a, B2a的载噪比最高. 综上, B3I和B2a的载噪比高于B1I和B1C.

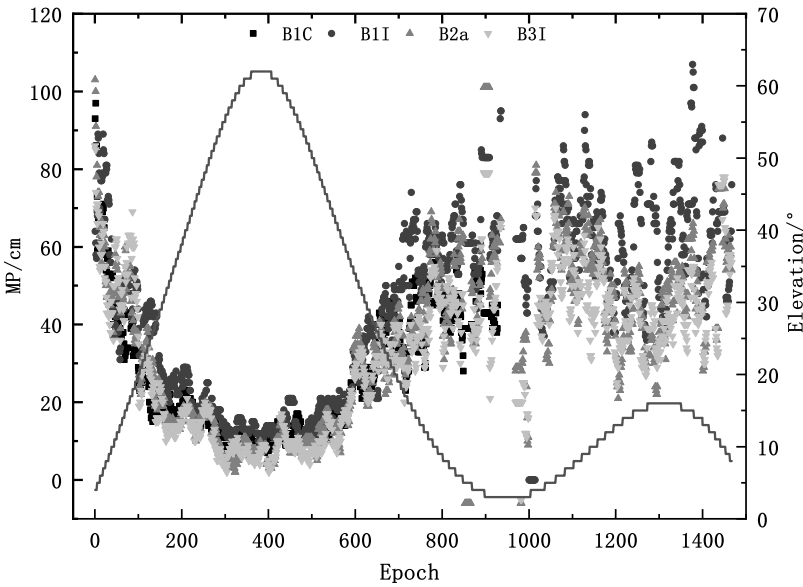


图 2 CUSV测站C24卫星BDS B1I、B1C、B2a、B3I各频点多路径误差图

Fig. 2 Multipath error map of various frequency points for BDS B1I, B1C, B2a, B3I of CUSV Station C24 Satellite

表 3 12个测站载噪比均值
Table 3 The average CNR of 12 stations

| Signal | B1I/ dBHz | B3I/ dBHz | B1C/ dBHz | B2a/ dBHz |
|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| CUSV | 42.63 | 44.89 | 42.44 | 46.59 |
| GAMG | 44.57 | 44.77 | 43.84 | 44.58 |
| IISC | 41.94 | 36.64 | 41.48 | 35.92 |
| JFNG | 43.21 | 43.88 | 43.60 | 43.09 |
| KITG | 43.85 | 45.75 | 43.02 | 44.56 |
| POTS | 41.70 | 41.58 | 42.61 | 47.88 |
| PTGG | 43.05 | 45.24 | 42.04 | 43.24 |
| SEYG | 42.89 | 44.49 | 42.32 | 42.14 |
| SGOC | 42.90 | 43.24 | 42.91 | 46.29 |
| SUTM | 41.61 | 42.14 | 42.78 | 48.09 |
| ULAB | 43.12 | 43.26 | 43.89 | 48.86 |
| WUH2 | 43.40 | 43.61 | 43.88 | 48.02 |
| mean value | 42.91 | 43.29 | 42.90 | 44.94 |

为了研究载噪比与卫星高度角的关系, 绘制2021年7月10日CUSV测站卫星C24的载噪比与高度角的时间序列图, 如图3所示, 从图中可以看出

B2a的载噪比最高, B3I其次, B1C与B1I相当. 还可以看出卫星的载噪比随着高度角升高而升高.

4.3 GPS、BDS-3、BDS-2/BDS-3信号双频定位性能分析

为了分析GPS、BDS-3、BDS-2/BDS-3的可视卫星数对定位精度及收敛时间的影响, 由于篇幅限制, 下面仅选取比较有代表性的CUSV、POTS、SGOC测站2021年7月10日的GPS L1/L2、BDS-3 B1I/B3I和B1C/B2a静态PPP定位偏差时间序列及GPS、BDS-3、BDS-2/BDS-3的卫星数量的时间序列. 从图4中3个测站不同卫星系统及信号各方向的误差时间序列和图5中3个测站不同卫星系统可用卫星数序列可以得出, 每个测站的GPS和BDS-3误差及卫星可用数量相差不大, 由于BDS-2是区域型卫星系统, 因此每个测站的卫星数相差较大, 且BDS-2的卫星空间结构不太好, 所以本文不再对单BDS-2卫星系统进行对比分析. 分析表明: 从CUSV、POTS、SGOC测站可以看出GPS和BDS-3卫星系统的卫星数量相差不大, 加入BDS-2系统后, BDS-2/BDS-3卫星系统的可用卫星数有所上升. 定位精度方面, 可以看出在E方向上, GPS与BDS-3、

BDS-2/BDS-3新旧信号相比精度较好一点, BDS-3、BDS-2/BDS-3的新信号较旧信号定位精度高、收敛速度快; 在N方向可以看出GPS与BDS-3、BDS-2/BDS-3新旧信号在同一水平上, 但对于BDS系统而言, BDS-3、BDS-2/BDS-3的新信号B1C/B2a比旧信号B1I/B3I的定位精度高、收敛速度快; 在U方向上可以看出GPS与BDS-3、BDS-2/BDS-3新旧信号的定位精度在同一水平上. BDS-3、BDS-2/BDS-3新旧信号进行对比分析可以发现, 新信号的定位精度高且收敛速度快, 其收敛时间快的原因是对BDS系统各频点的多路径误差而言, B1C小于B1I、B3I与B2a相当, 同时B1C/B2a载噪比高导致其无电离层组合的观测噪声更小.

为了进一步分析静态PPP的定位精度, 解算并统计12个测站5 d的5种方案的静态PPP定位精度以及12个测站3个方向定位误差均方根(root mean error, RMS), 分别如表4和图6所示. 由表4可以得出GPS、BDS-3及BDS-2/BDS-3新旧信号在E方向上的定位精度在同一水平上, 都达到了1.1 cm左右; BDS-3、BDS-2/BDS-3新信号B1C/B2a与GPS L1/

L2在N方向上的定位精度在同一水平上, 精度达到了0.8 cm左右, 与BDS-3、BDS-2/BDS-3老信号B1I/B3I相比, 定位精度提升了10.1%; BDS-3、BDS-2/BDS-3老信号B1I/B3I与GPS L1/L2在U方向上的定位精度在同一水平上, 精度达到了2.5 cm左右, 与BDS-3、BDS-2/BDS-3新信号B1C/B2a相比, 新信号B1C/B2a定位精度分别提升了34.2%、21.2%. 在收敛时间方面, BDS-3与BDS-2/BDS-3的新信号B1C/B2a的收敛时间相当, 收敛时间为25 min左右, 优于GPS L1/L2, 分别减少了1.8 min、2.9 min, 较老信号分别提高了12.7%、11.7%. 由图6可以整体看出N方向上的定位精度要优于E和U方向的定位精度, 在E方向, GPS的整体精度优于BDS卫星系统, BDS-3、BDS-2/BDS-3的新旧信号的定位精度相当, 在U方向上, BDS-3、BDS-2/BDS-3的定位精度优于GPS定位精度, BDS-3、BDS-2/BDS-3的新信号B1C/B2a整体优于BDS-3、BDS-2/BDS-3的旧信号B1I/B3I; 对于BDS-3及BDS-2/BDS-3定位精度及收敛时间没有较大变化的原因, 可能是没考虑BDS-2/BDS-3之间的系统误差.

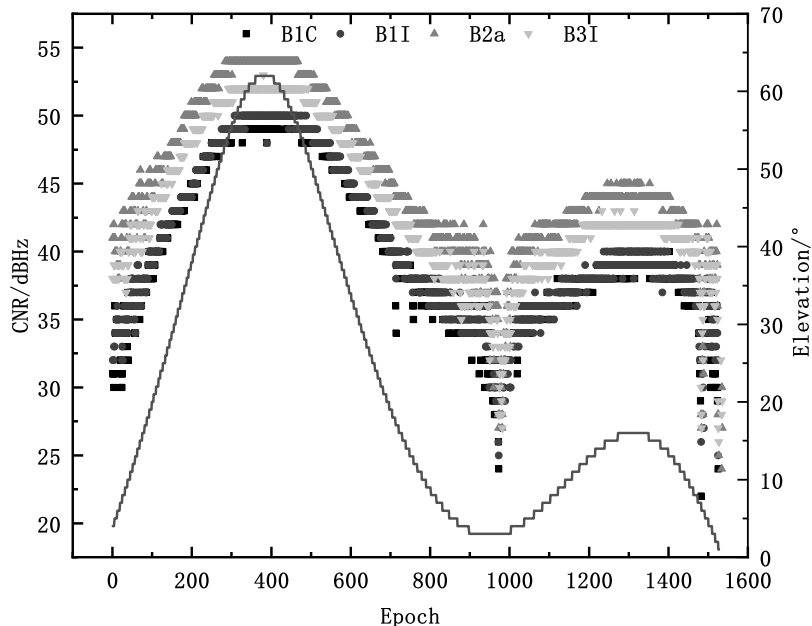


图3 CUSV测站C24卫星BDS B1I、B1C、B2a、B3I各频点载噪比图

Fig. 3 Carrier to noise ratio diagram of each frequency point of BDS B1I, B1C, B2a, B3I on the C24 satellite of CUSV station

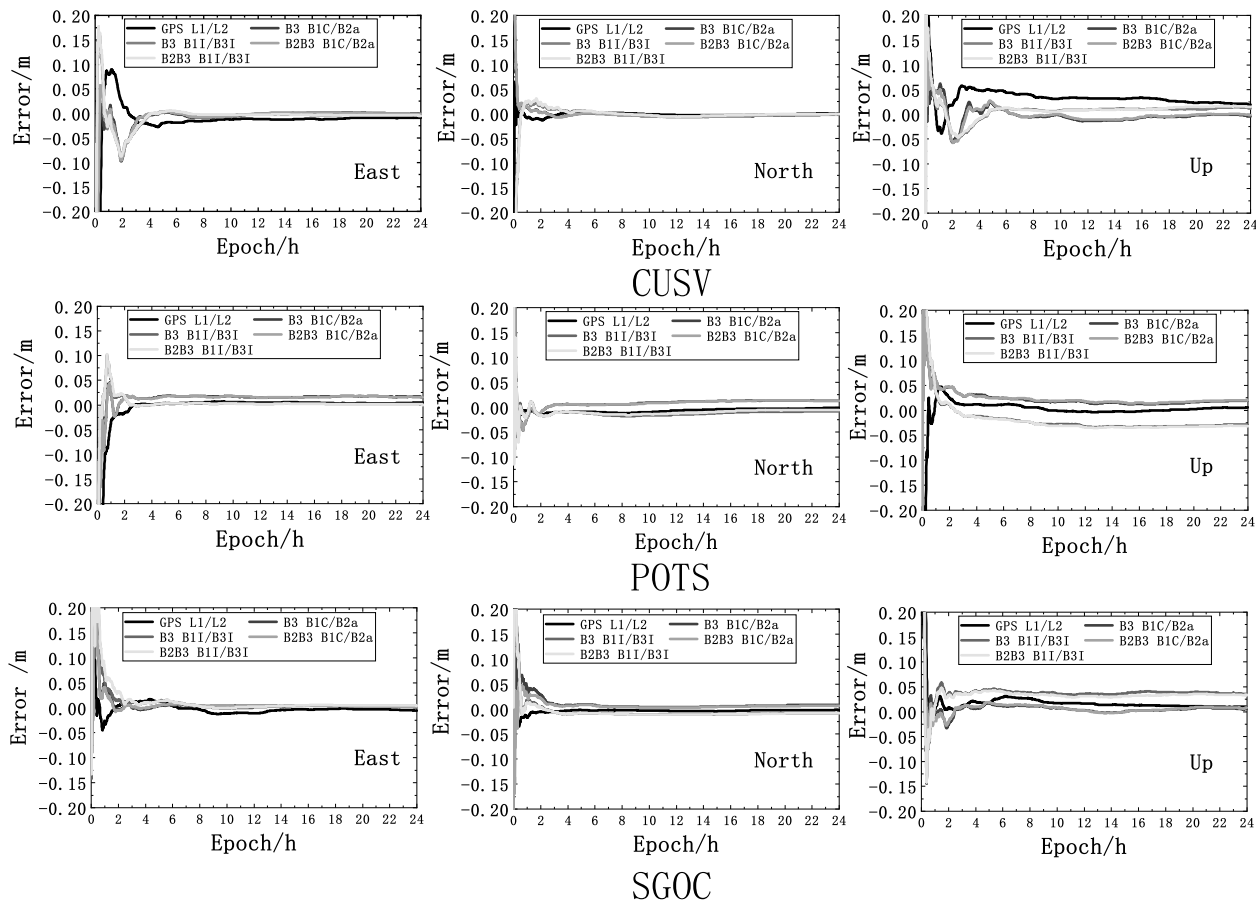


图 4 CUSV、POTS、SGOC测站不同卫星系统及信号各方向误差时间序列图

Fig.4 Time series diagrams of different satellite systems and signal errors in different directions at CUSV, POTS, and SGOC stations

表 4 2021年7月10日—2021年7月14日12个测站静态PPP统计结果
Table 4 Static PPP statistical results of 12 stations during 10 July 2021—14 July 2021

| Satellite system type | BDS-3 | | BDS-2/BDS-3 | | GPS |
|-----------------------|---------|---------|-------------|---------|-------|
| Signal type | B1C/B2a | B1I/B3I | B1C/B2a | B1I/B3I | L1/L2 |
| East/cm | 1.25 | 1.21 | 1.21 | 01.25 | 1.04 |
| North/cm | 0.89 | 0.98 | 0.81 | 0.97 | 0.77 |
| Up/cm | 1.67 | 2.54 | 1.96 | 2.49 | 2.37 |
| Convergence time/min | 25.9 | 29.7 | 24.8 | 28.1 | 27.7 |

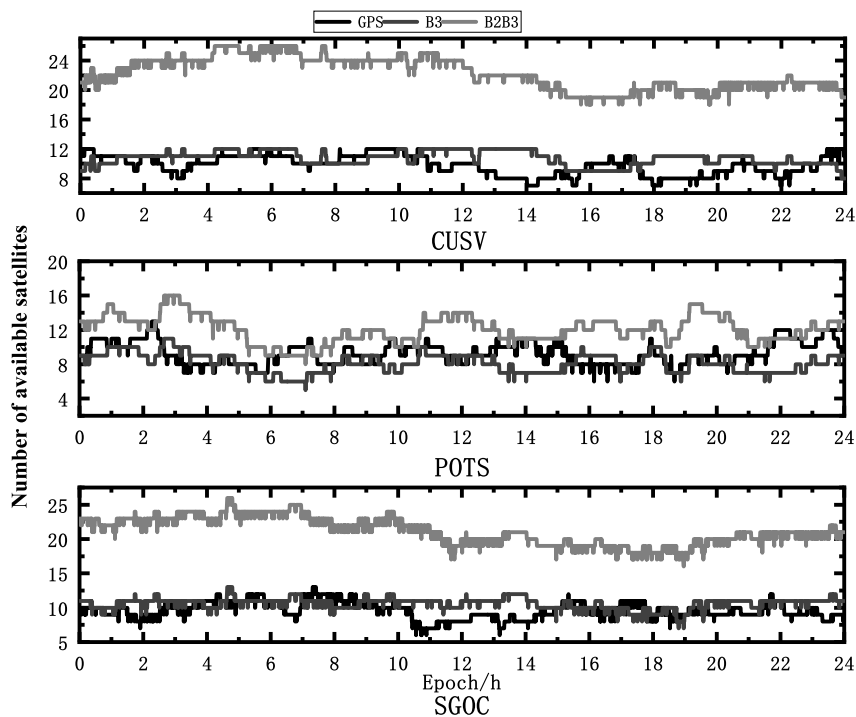


图 5 CUSV、POTS、SGOC 测站不同卫星系统可用卫星数序列图

Fig. 5 Sequence diagram of available satellite numbers for different satellite systems at CUSV, POTS, and SGOC stations

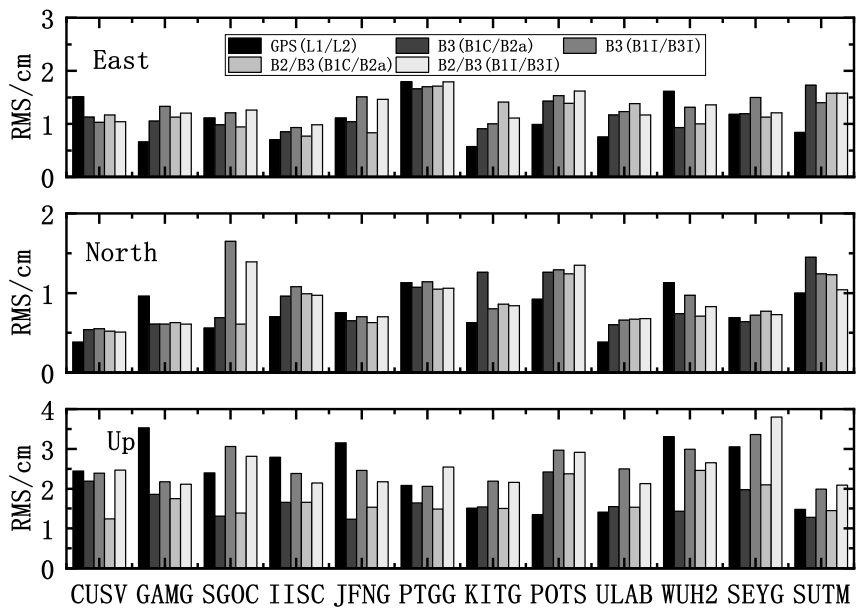


图 6 12 个测站静态 PPP 定位误差 RMS

Fig. 6 Static PPP positioning error RMS of 12 stations

4.4 BDS-3/GPS、BDS-2/BDS-3/GPS组合系统信号双频定位性能分析

为了分析BDS-3/GPS、BDS-2/BDS-3/GPS的可视卫星数对定位精度的偏差及收敛时间的影响,以2021年年积日(Day Of Year, DOY) 191 d

CUSV测站数据为例进行分析,图7为静态定位曲线,图8为可用卫星数序列图.由图7和图8可以看出,GPS+BDS组合系统比单系统定位精度高,随着不同组合卫星系统的卫星数量增加,有助于改善卫星的空间分布结构,减小收敛时间.

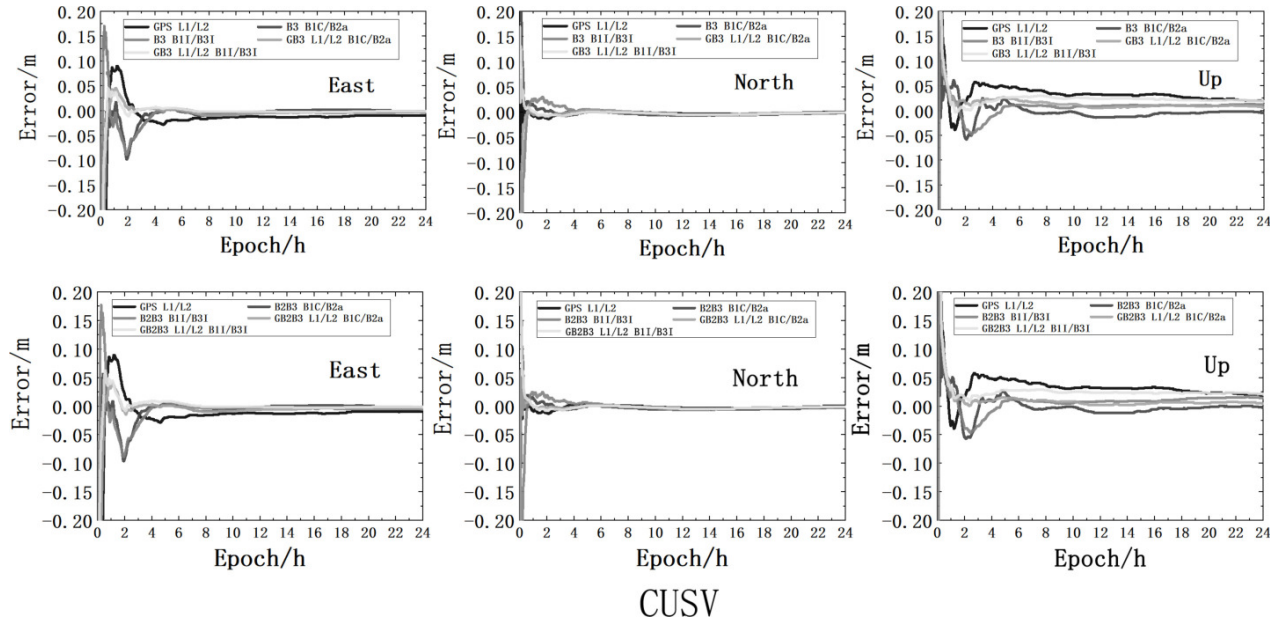


图7 CUSV测站不同卫星系统及信号各方向误差时间序列图

Fig. 7 Time series diagram of different satellite systems and signal errors in different directions at CUSV station

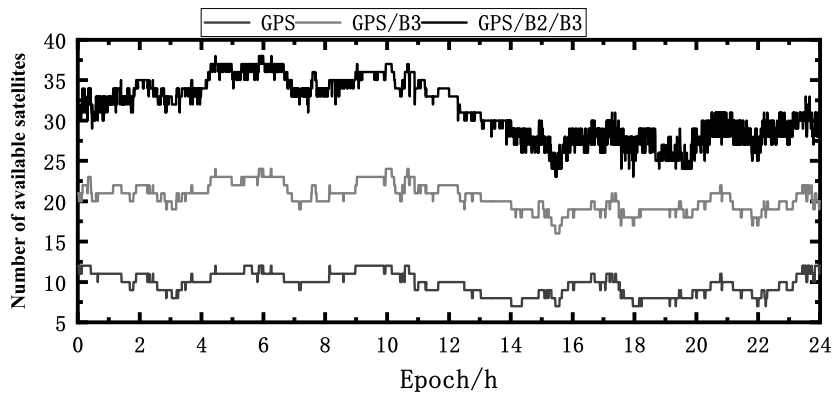


图8 CUSV测站不同卫星系统可用卫星数序列图

Fig. 8 Sequence diagram of available satellite numbers for different satellite systems at CUSV station

为了进一步分析定位精度误差及收敛时间,解算并统计了12个测站5种方案5 d的静态PPP定位

精度以及3个方向的定位误差RMS.表5为12个测站5 d的5种方案的静态定位误差及收敛时间.由表4

和表5可以看出, GPS与BDS组合系统较单个系统收敛时间缩短; GPS/BDS-3与GPS/BDS-2/BDS-3的新旧信号收敛速度相当, GPS/BDS-3、GPS/BDS-2/BDS-3新信号(B1C/B2a)较旧信号(B1I/B3I)分别提升了17.6%、19.1%。从定位精度进行分析, 由表5可以看出, 5种PPP解算方案在E方向上的定位精度相当, 定位精度在1.0 cm左右; 在N方向上的定位精度, GPS、GPS/BDS-3旧信号(B1I/B3I)、GPS/BDS-2/BDS-3在同一水平上, 其GPS/BDS-3、GPS/BDS-2/BDS-3新信号(B1C/B2a)与旧信号相比, 定位精度略有提高; 在U方向上, GPS定位精度与GPS/BDS-3、

GPS/BDS-2/BDS-3旧信号相比后者定位精度略高, 新信号(B1C/B2a)比旧信号(B1I/B3I)分别提高了17.2%、15.3%。图9所示为12个测站3个方向的PPP定位RMS。由图9可以得出, 在整体上N方向上的定位精度高于E、U方向, 组合系统GPS/BDS较GPS单系统定位精度高; 在E方向, GPS与GPS+BDS组合的定位精度相当, GPS/BDS-3、GPS/BDS-2/BDS-3的新旧信号定位精度相当; 在N方向, GPS/BDS-3、GPS/BDS-2/BDS-3的新信号整体略优于旧信号; 在U方向, GPS/BDS-3、GPS/BDS-2/BDS-3的新信号全面优于旧信号, 定位精度有了较大的提高。

表 5 2021年7月10日—2021年7月14日12个测站静态PPP统计结果
Table 5 Static PPP statistical results of 12 stations during 10 July 2021 — 14 July 2021

| Satellite system type | GPS/BDS-3 | | GPS/BDS-2/BDS-3 | | GPS |
|-----------------------|-----------|---------|-----------------|---------|-------|
| Signal type | B1C/B2a | B1I/B3I | B1C/B2a | B1I/B3I | L1/L2 |
| East/cm | 0.93 | 0.88 | 0.94 | 0.87 | 1.04 |
| North/cm | 0.67 | 0.75 | 0.67 | 0.74 | 0.77 |
| Up/cm | 1.53 | 1.85 | 1.54 | 1.82 | 2.37 |
| Convergence time/min | 20.1 | 24.4 | 19.8 | 24.5 | 27.7 |

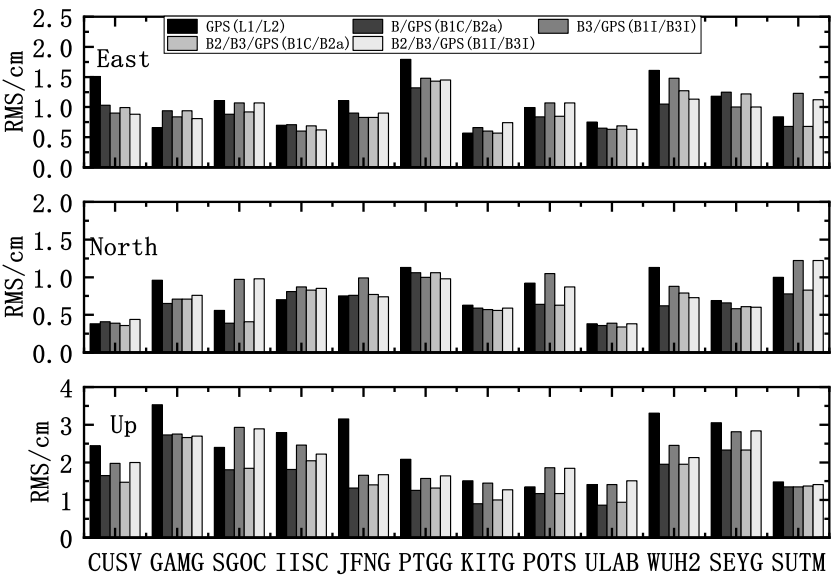


图 9 12个测站静态PPP定位误差RMS

Fig. 9 Static PPP positioning error RMS of 12 stations

5 结束语

本文通过选用12个测站5 d的观测数据, 先建立了信号融合双频无电离层组合函数模型, 然后对BDS-2/GPS、BDS-3/GPS、BDS-2/BDS-3/GPS组合卫星系统进行了研究, 得出以下结论:

(1) BDS-3新旧频点在E、N方向的定位精度与GPS L1/L2在同一水平上, U方向的新频点定位精度高于GPS L1/L2和BDS-3旧频点, 较旧频点定位精度提升了34.2%; 在收敛速度上新频点比旧频点提升了12.7%, 新频点收敛时间为25.9 min, 收敛后的E、N、U方向定位精度分别为1.25 cm、0.89 cm、1.67 cm, BDS-2/BDS-3与BDS-3相比, 新旧频点定位精度未有提升, 收敛速度略有提升;

(2)相较于BDS、GPS单系统, 组合系统BDS/GPS定位精度和收敛时间有了明显的提高, BDS-3 (B1C/B2a)+GPS在E、N方向上与BDS-3 (B1I/B3I)+GPS定位精度相当, 在U方向上定位精度前者较后者有了明显的提升, 提升了17.2%; 收敛时间上, 新频点比旧频点提升了17.6%, 收敛时间为20.1 min, 收敛后的E、N、U方向定位精度分别为0.93 cm、0.67 cm、1.53 cm, GPS/BDS-2/BDS-3与GPS/BDS-3相比, 定位性能相当, 在同一水平上;

(3)综上所述, GPS/BDS组合卫星系统优于单

卫星系统, BDS-3的新频点定位性能优于旧频点.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

参考文献

- [1] 张小红, 胡家欢, 任晓东. 测绘学报, 2020, 49: 1084
- [2] 谭述森. 测绘学报, 2017, 46: 1284
- [3] 张小红, 李星星, 李盼. 测绘学报, 2017, 46: 1399
- [4] 陈军. 北斗卫星导航定位系统应用综述: 第九届全国信号和智能信息处理与应用学术会议专刊, 2015
- [5] Shi J, Ouyang C, Huang Y, et al. GPS Solutions, 2020, 24: 1
- [6] 张宝成, 欧吉坤, 李子申, 等. 测绘学报, 2011, 40: 447
- [7] 李玉忠, 马进全. 测绘地理信息, 2020, 45: 37
- [8] 刘生锋, 杨文龙, 谷涛. 测绘通报, 2021, 69: 11
- [9] Yao Y, Peng W, Xu C, et al. JGeod, 2019, 93: 1283
- [10] Zhu Y, Zheng K, Cui X, et al. AdSpR, 2021, 67: 2483
- [11] Shi J, Ouyang C, Huang Y, et al. GPS Solutions, 2020, 24: 1
- [12] Qu P. Sensors, 2021, 21: 5780
- [13] 祝会忠, 杨添宇, 赵洪涛, 等. 测绘科学, 2020, 45: 1
- [14] 周锋, 徐天河. 测绘学报, 2021, 50: 61
- [15] 范曹明, 王胜利, 欧吉坤. 测绘学报, 2016, 45: 1165
- [16] 胡金林. 北斗卫星导航定位系统应用综述: 第十三届华东六省一市测绘学会学术交流会议论文集, 2011
- [17] 聂志喜. 观测值误差多模GNSS精密单点定位模型统一理论与方法研究. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017: 27-51

Accuracy Analysis of Dual-frequency Precise Single-point Positioning of BDS-3 New Signals

LU Fu-kang^{1,2,3} YU Xue-xiang^{1,2,3} XIAO Xing-xing^{1,2,3} HU Fu-jie^{1,2,3}

(1 School of Spatial Information and Geomatics Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001)

(2 Coal Industry Engineering Research Center of Mining Area Environment and Disasters Collaborative Monitoring, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001)

(3 Key Laboratory of Aviation-aerospace-ground Cooperative Monitoring and Early Warning of Coal Mining-induced Disasters of Anhui Higher Education Institutes, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001)

ABSTRACT BeiDou navigation satellite system (BDS) has been officially built and opened in July 2020. BDS-3 adds new signals B1C and B2a on the basis of old signals B1I and B3I. In order to comprehensively evaluate the positioning performance of new signals B1C and B2a of BDS-3, the positioning performance of GPS (Global Positioning System), BDS-3, BDS-2/BDS-3 old and new signals and the positioning performance of BDS combined with GPS at different frequency points are tested. The positioning performance of BDS (B1I+B3I, B1C/B2a) + GPS (L1+L2) combined static PPP (Precise Point Positioning) is analyzed

and compared with that of single satellite system. The experimental results show the positioning accuracy of BDS-3 (B1C/B2a) in E (East), N (North), U (Up) direction is better than 1.25 cm, 0.89 cm, 1.67 cm, respectively. The positioning accuracy of BDS-3 new and old frequency points in E and N directions is the same as that of GPS L1/L2, and the positioning accuracy of new frequency points in U direction is higher than that of GPS L1/L2 and BDS-3 old frequency points, which is 34.2% higher than that of old frequency points. The convergence time of the new frequency point is 25.9 min, which is 12.7% higher than that of the old frequency point. Compared with BDS and GPS single systems, BDS/GPS positioning accuracy and convergence time of the combined system have been significantly improved. BDS-3 (B1C/B2a)+GPS has the same positioning accuracy as BDS-3 (B1I/B3I)+GPS in E and N directions. In the U direction, the positioning accuracy of the former is significantly improved compared with the latter, which is increased by 17.2%. The convergence time of the new frequency point of the combined system is 20.1 min, which is 17.6% higher than that of the old frequency point.

Key words satellite positioning, PPP, BDS-3, BDS-2/BDS-3, BDS/GPS, positioning accuracy, convergence time